硅藻中国新记录种——帕瓦拉桥弯藻

龙继艳[1]，刘冰[1*]，周阳艳[1]，徐三妹[1,2]，陈锦华[1]

(1. 吉首大学 生物资源与环境科学学院，湖南 吉首 416000；2. 怀化师范高等专科学校 文理综合学院，湖南 怀化 418000)

摘要：在对湖南省硅藻多样性研究过程中，该文发现其中一采自湘江的桥弯藻种类具有以下鉴定特征：(1) 细胞小，其长度小于 29 μm；(2) 壳面略微呈背腹之分；(3) 远缝端末梢向壳面背侧弯曲；(4) 顶孔区很小，由 1~3 横列形态不同的两种类型孔纹组成：一种孔纹与壳面上的孔纹相似，呈狭缝隙状；另一种为圆形小孔，其内部开口上方有袋盖状硅质突出物覆盖；(5) 壳面背侧中部处线纹密度 10~12 条/10 μm、腹侧中部处 11~13 条/10 μm，孔纹密度为 30~40 个/10 μm；(6) 在靠近壳面腹侧中央区具有 1~2 个孤点。经与帕瓦拉桥弯藻(*Cymbella pavanaensis* Vigneshwaran et al.)模式种群相比较，该文确定上述桥弯藻即为帕瓦拉桥弯藻。该文提供了对帕瓦拉桥弯藻超微结构的更多清晰认识，扩大了其地理分布区域，且是该种在中国的首次报道。

关键词：桥弯藻属，顶孔区，孤点，超微结构，新记录

中图分类号：Q949　　**文献标志码**：　　**文章编号**：

Cymbella pavanaensis A. Vigneshwaran et al., a diatom reported for the first time in China

LONG Jiyan[1], LIU Bing[1*], ZHOU Yangyan[1], XU Sanmei[1, 2], CHEN Jinhua[1]

(1. *College of Biology and Environmental Sciences*, *Jishou University*, Jishou 416000, Hunan, China; 2. *School of Arts and Sciences, Huaihua Normal College*, Huaihua 418000, Hunan, China)

Abstract: During the process of studying the diatom diversity of Hunan province, we found that a *Cymbella* species collected from Xiang River possesses the following diagnostic features: (1) Cells are small and their lengths are less than 29 μm; (2) Valves exhibit slight dorsiventrality; (3) Distal raphe fissures are dorsally deflected; (4) Apical pore fields are very small and composed of 1-3 transapical rows of porelli, which comprise two forms: one is slit-like, similar to the areolae on the valve face, and the other is rounded with internal openings covered by the flap-like silica projections; (5) Striae 10-12/10 μm at the dorsal middle part, 11-13/10 μm at the ventral middle part, and areolae 30-40/10 μm; (6) 1-2 stigmata exist near the valve ventral central area. After comparing this species with the type population of *Cymbella pavanaensis* Vigneshwaran et al., the current paper identifies it as *C. pavanaensis*. This paper provides a clearer knowledge of the ultrastructure of *C. pavanaensis*, enlarges its geographical distribution region, and is also its report for the first time in China.

Key words: *Cymbella*, apical pore field, stigma, ultrastructure, new record

桥弯藻属(*Cymbella* Agardh)于 1830 年创立(Agardh, 1830)，它是硅藻门中重要类群，也是较大的硅藻属之一(Kapustin et al., 2018)。Krammer (2002)在其桥弯藻属专著中将该属的主要鉴定特征归纳为：(1) 壳面具有背腹之分，即有弯曲程度大的背侧和弯曲程度较小或平直或内凹的腹侧；(2) 两个远缝端末梢皆向壳面背侧弯曲；(3) 绝大多数种类壳面两末端具有顶孔区；(4) 多数种类腹侧有一个或多个孤点。Krammer (2002) 在其专著中给出了桥弯藻

基金项目：国家自然科学基金(31760051) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31760051)]。

第一作者：龙继艳(2000-)，硕士研究生，(E-mail) 2215656702@qq.com。

***通信作者**：刘冰，博士，副教授，主要从事硅藻分类及生态研究，(E-mail) jsulb@outlook.com。

属的 129 种和 31 个变种详细资料，其中 100 个种(63%)被确定为新种或新变种。Krammer 2002 年的专著是目前世界范围内广泛采用的桥弯藻属种类鉴定的重要参考文献。

Guiry & Guiry (2021)在 AlgaeBase 网站上列出了该属的 1576 种(和种下)名称，其中 357 种是目前接受的分类名称。近年来，中国学者对中国的桥弯藻属相继进行了许多研究(例如 Hu et al., 2013; Gong et al., 2013; Zhang et al., 2017; Zhang et al., 2018; Liu et al., 2018, 2020; Zhang et al., 2021; Liu et al., 2021)。施之新(2013)发表了关于中国桥弯藻科(Cymbellaceae)的专著，其中包括桥弯藻属的 49 种和 5 个变种，是对中国桥弯藻属的一个较全面的研究总结。然而，中国是一个幅员辽阔的大国，具有丰富多样的水域生态系统，许多重要或关键地区水域生态系统的硅藻尚未有人涉足，因此，在中国，桥弯藻及其他硅藻仍急需进一步探索和发现。在对湘江的石附生硅藻研究中，我们发现了一些尚未报道过的硅藻种类，本文报道其中一中国新记录种——*Cymbella pavanaensis* 帕瓦拉桥弯藻[新拟，种加词 *pavanaensis 是指该种的模式种发现地点：印度的帕瓦拉河](Cymbella pavanaensis* Vigneshwaran et al., 2019)。

1 材料和方法

本文的硅藻样品于 2021 年 10 月 3 日采自于湘江的左支，具体取样点位于广西兴安县的江脊(地理坐标为 25°39′55″ N，110°41′47″ E，海拔 210 m)。取样水体的基本理化信息为温度：（28.53 ± 0.05）℃、pH：8.66 ± 0.05、电导率：（224.33 ± 1.25） μS・cm^{-1}。取样方法为：选择水下带有较多黄褐色生物膜的石头，用牙刷把岩石表面的附生硅藻用力刷入塑料盘内，然后冲洗石头被刷表面残留样品到塑料盘内。将盘内收集的硅藻样品倒入 100 mL 的样品瓶中，每个样点收集两瓶。取好后用 70%的酒精固定，然后密封带回实验室处理。

在实验室采用常规方法处理硅藻样品，具体方法为：从取回的硅藻样品溶液中吸取 25 mL 溶液，移入洗净的 250 mL 烧杯中，加入 30%双氧水 50 mL，在 80 °C 恒温加热 6 小时，氧化除掉有机物质，然后加入 5 mL 10%的 HCl 除掉含钙化合物，再加入去离子水静置 12 h 后吸去上清液，这个过程重复 5 次以得到干净的硅藻标本。然后利用 Naphrax 封装剂制成永久装片以供光学显微镜观察和拍照(德国徕卡光学显微镜和摄像头，型号分别为 Leica DM2000 和 Leica MC190 HD)。永久装片保存在吉首大学标本馆。扫描电镜观察在湖南怀化学院完成(德国卡尔蔡司场发射扫描电子显微镜，型号 Sigma HD)。

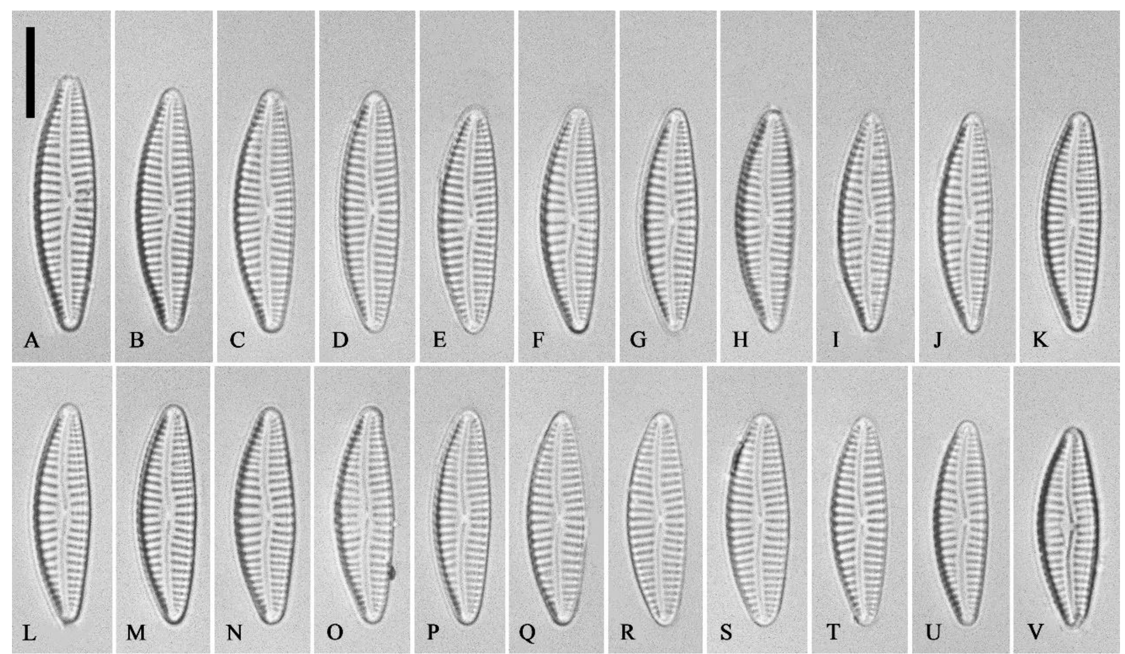
本研究中文硅藻术语主要参照 Round 等(1990)推荐的相关术语，这里列出一些本文中重要的中英文术语对照和英文缩写，以方便读者阅读。壳面(valve)、孤点(stigma, 复数 stigmata)、线纹(stria, 复数 striae)、孔纹(areola, 复数 areolae)、线性孔纹(lineola, 复数 lineolae)、中央节(central nodule)、顶孔区(apical pore fields, APF)、壳缝(raphe)、近缝端(proximal raphe ending)、远缝端末梢(distal raphe fissure)、外面观(external view)、内面观(internal view)、螺旋舌(helictoglossa, 复数 helictoglossae)、光学显微镜(light microscope, LM)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)。

2 研究结果

帕瓦拉桥弯藻(新拟，图版 I，图版 II，图版 III)

Cymbella pavanaensis A. Vigneshwaran, Kulikovskiy, Kociolek & B. Karthick, in Vigneshwaran et al. 2019, p. 212: Fig. 1-28; p. 214: Fig. 29-32; p. 215: Fig. 33-36.

光学显微镜观察(图版 I)：壳面稍具背腹之分，椭圆披针形，背缘明显凸出，腹部边缘稍凸。两端几乎不延伸，宽圆形到狭圆形；壳面大小为(测量 31 个标本)：长 22~28 μm，宽 5~6 μm，长宽比 3.7~4.9。无中央区，中轴区窄，线形。壳缝基本位于壳面中部，近缝端丝状，远缝端丝状并弯向背侧。腹侧有 1~2 个孤点，但是紧靠中部线纹的中央末端，所以光镜下难以确定。线纹几乎平行，在靠近两端处线纹呈放射状。背侧中部线纹密度 10~12 条/10 μm，腹侧中部线纹密度 11~13 条/10 μm。孔纹细，在光镜下难以区分。



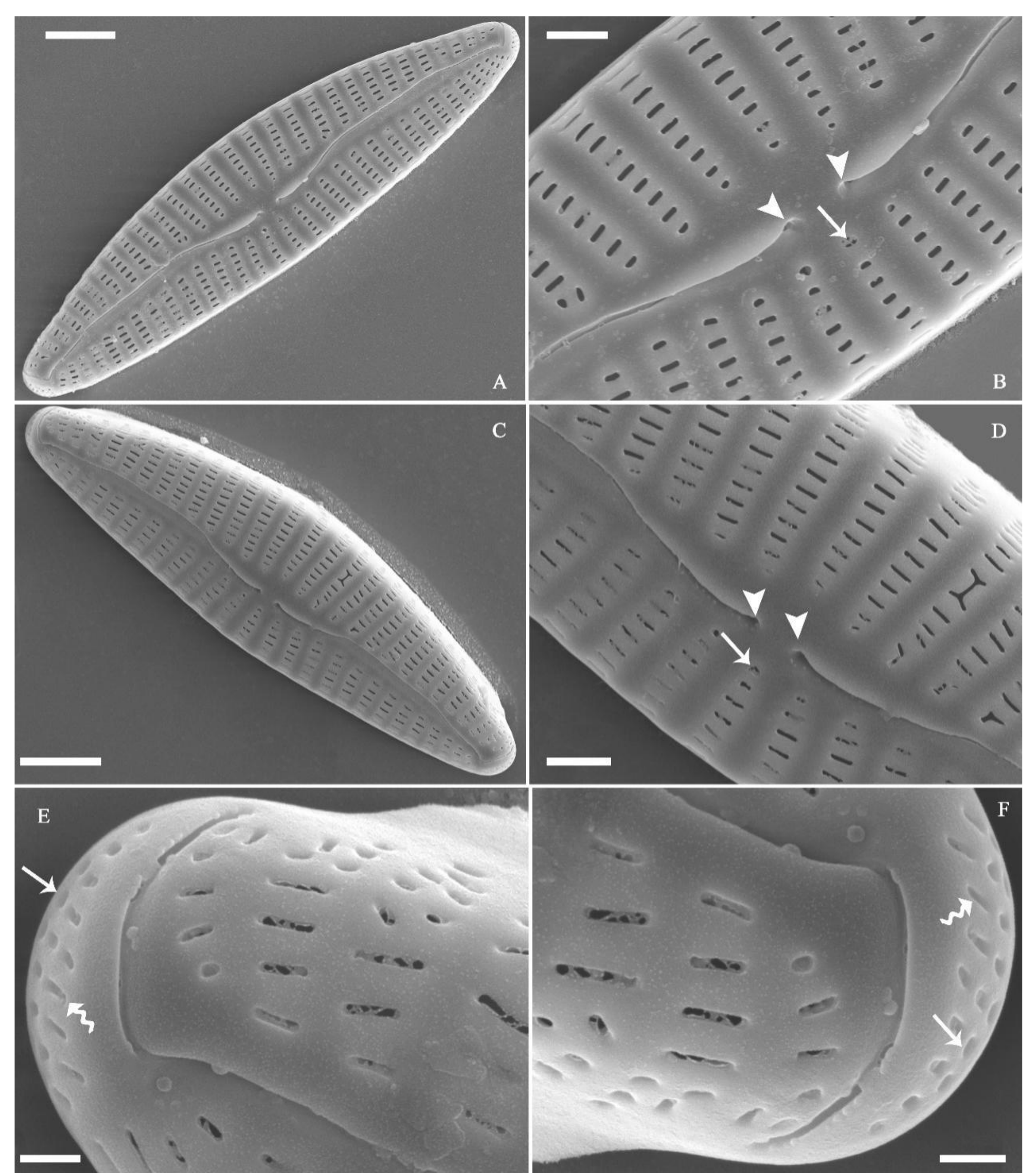
A-V. 22 个壳面展示一个按大小排列的递减系列，注意略微呈背腹之分的壳面。图 A-V 标尺为 10 μm (如图 A 所示)。

A-V. Twenty-two valves showing a diminution series, note the valves are slightly dorsiventral. Scale bar = 10 μm (Fig. A-V, in Fig. A for all figures).

图版 Ⅰ 帕瓦拉桥弯藻光学显微镜图(1 000×)

Plate Ⅰ *Cymbella pavanaensis,* LM (1 000×)

扫描电子显微镜观察(图版 II；图版 III)：壳面椭圆披针形(图版 II：A, C；图版 III：A, C)。无中央区。腹侧孤点外侧开口为简单圆形，无膜覆盖(图版 II：B, D 中两箭所示)；孤点内侧开口为狭缝隙状，周围被齿状的硅质物所围绕(图版 III：B, D 中三箭所示)。壳缝基本位于壳面中部，外远缝端末梢向背侧弯曲，外近缝端存在中央孔并偏向背侧(图版 II：B 和 D 中四箭头所示)。从壳内面看，远缝端终止于螺旋舌(图版 III：E-F 中两弯箭所示)，而近缝端不可见，被帽状的硅质结构所遮盖(图版 III：B, D 中两弯箭所示)。线纹单列，孔纹狭缝隙状，孔纹的宽度从壳面中间向边缘逐渐增加，孔纹密度 30~40 个/10 μm。末端具有很小的顶孔区，由 1~3 列横向小孔组成，小孔有两种形状：一种与壳面孔纹相似呈狭缝隙状(图版 II：E-F 中两弯箭所示)，另一种则是圆形的小孔(图版 II：E-F 中两箭所示)，顶孔区小圆孔内部开口上方有袋盖状硅质突出物覆盖(图版 III：E-F 中两箭所示)。

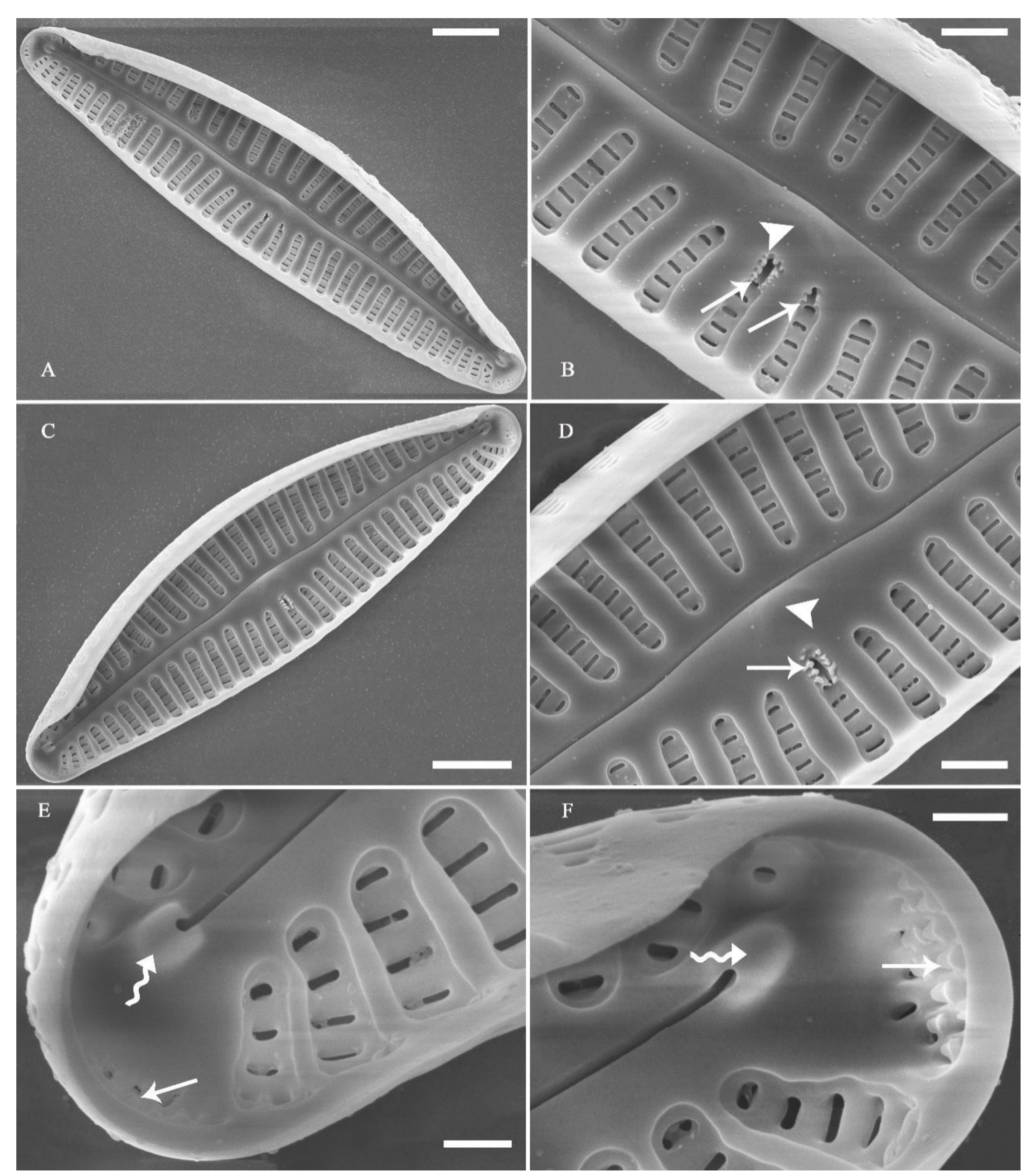


A. 一个完整的壳面；**B.** 示图 A 的中部细节，注意腹侧孤点外侧圆形的开口(B 中箭所示)、中央孔偏向背侧(B 中两箭头所示)，以及狭缝隙状孔纹开口；**C-D.** 另一个完整壳面及其中部细节，展示以上提到的特征；**E-F.** 示两个末端细节，注意顶孔区由两种形态的孔纹组成，一种狭缝隙状(E 和 F 中各一弯箭所示)，另一种是圆形(E 和 F 中各一箭所示)。图 A 和图 C 标尺为 3 μm；B 和 D 标尺为 1 μm；图 E-F 标尺为 300 nm。

A. A complete valve; **Fig. B.** Middle part detail from Fig. A, note the rounded opening of stigma on the ventral side (Fig. B, one arrow), the dorsally deflected central pores (Fig. B, two arrowheads), and lineolate areolae; **C-D.** Another complete valve and its detailed middle part showing the above-mentioned features; **E-F.** Two apical details, note the two forms of porelli in the APF: linear (Fig. E and Fig. F, one curved arrow respectively) and rounded (Fig. E and Fig. F, one arrow respectively). Scale bars = 3 μm (Fig. A, C), 1 μm (Fig. B, D), 300 nm (Fig. E-F).

图版 II 帕瓦拉桥弯藻扫描电子显微镜图，外壳面观

Plate II *Cymbella pavanaensis*, valve external view, SEM



A. 一个完整的壳面；**B.** 示图 A 的中部细节，注意腹侧 2 个孤点的内侧开口被齿状硅质物环绕(图 B 中两箭所示)，壳缝两内侧近缝端的中断不可见(图 B 中弯箭所示)；**C-D.** 另一个完整壳面及其中部细节，展示以上提到的特征；**E-F.** 示两个末端细节，注意顶端小圆孔内部开口上方有一个袋盖状突出物存在(图 E 和图 F 中各一箭所示)，但是狭缝隙状孔纹内部开口无覆盖物，以及发达的螺旋舌(图 E 和图 F 中各一弯箭所示)。图 A 和图 C 标尺为 3 μm；图 B 和图 D 标尺为 1 μm；图 E 和图 F 标尺为 400 nm。

A. A complete valve; **B.** Middle part detail from Fig. A, note the internal openings of two stigmata are convoluted by tooth-like projections (Fig. B, two arrows) and two proximal raphe ends are invisible (Fig. B, arrowhead); **C-D.** Another complete valve and its detailed middle part, showing the above-mentioned features; **E-F.** Two apical details, note the flap-like projections cover the inner openings of small round porelli (Fig. E-F, one arrow respectively) whereas the lineolate internal openings have not occlusions, and robust helictoglossae (Fig. E-F, one curved arrow respectively). Scale bars = 3 μm (Fig. A, C), 1 μm (Fig. B, D), 400 nm (Fig. E, F).

图版 III 帕瓦拉桥弯藻扫描电子显微镜图，内壳面观

Plate III *Cymbella pavanaensis*, valve internal view, SEM

3 讨论

Cymbella kolbei Hustedt、*C. kolbei* var. *angusta* Krammer、*C. hustedtii* Krasske 和 *C. tridentina* Lange-Bertalot, Cantonati & Scalfi 四个桥弯藻种类与帕瓦拉桥弯藻具有相似的形态特征。Vigneshwaran 等(2019)在发表帕瓦拉桥弯藻时已对它们之间的区别进行了仔细比较和分析(参见 Vigneshwaran et al., 2019, p. 213, table 2)，本文不再重复列表比较它们之间的区别，但是为了便于读者更清楚地认识帕瓦拉桥弯藻形态特征，这里对 Vigneshwaran 等(2019)一文中的表 2 的内容翻译和说明如下：帕瓦拉桥弯藻与 *C. hustedtii* 的区别在于前者腹侧着生有 1 到 2 个孤点，但是后者腹侧没有孤点。帕瓦拉桥弯藻的顶孔区由两种不同形态的孔纹组成，即狭缝隙状的与壳面孔纹相似的孔纹和圆形的孔纹组成，但是 *C. kolbei*、*C. kolbei* var. *angusta* 和 *C. tridentina* 的顶孔区都只由一种形态类型的孔纹(圆形小孔纹)组成。帕瓦拉桥弯藻无中央区，而 *C. kolbei*、*C. kolbei* var. *angusta*、*C. tridentina* 存在很小的中央区。从以上比较可以看出，帕瓦拉桥弯藻具有孤点、其顶孔区由两种类型的孔纹组成和无中央区存在是与其它相似种类相区分的独特性状组合。

帕瓦拉桥弯藻的模式种群是发现于印度的帕瓦拉河，该河是一条中等富营养化的河流(Vigneshwaran et al., 2019)。在本文中的帕瓦拉桥弯藻种群取样点，我们发现河岸两边有许多福寿螺(*Pomacea canaliculata* Lamarck)粉红色的卵，我们推测该河流可能有较多福寿螺存在。福寿螺繁殖能力强、食量大，其分泌物和排泄物会大量进入生存的水体中，导致水体 pH 值下降从而降低光合细菌的消化速度，抑制水体中氮化合物的分解，促进水体中藻类和微生物的繁殖(胡云逸等，2021)。同时福寿螺产生的污染物可随水流形成更大范围的污染，或在某些静水地段发生汇集，造成严重的水体富营养化(潘冬丽等，2014)。另外，取样河流的两侧有许多水稻田。众所周知，水稻种植离不开 N 肥和 P 肥，其施肥量对水质产生重要影响，农户长期施肥会造成 N、P 不断积累，可导致周围水体严重富营养化(李纪华等，2015)。因此，我们推测本文中的帕瓦拉桥弯藻生境是富营养化的水体。基于以上形态上的比较和生态需求的相似，我们可以充分确定本文中的帕瓦拉桥弯藻身份。本研究中的帕瓦拉桥弯藻有时具有两个孤点。孤点的存在与否，需要通过扫描电镜观察到其内部开口后才能确定，但是实际情况是很多研究者在电镜下只观察少量标本，所以对孤点的统计往往不准确。基于本文的研究结果，帕瓦拉桥弯藻的孤点数量应被修订为每个壳面具有 1~2 个。

从全球来看，目前硅藻的分类仍然是基于形态学上的特征来进行，不仅属与属之间的区分，而且同属之下各种类之间的区分，都越来越依赖超微结构特征(Round et al., 1990; Hamilton et al., 2019a; Hamilton et al., 2019b)。在桥弯藻属种类的鉴定中，壳面形状、中央区和线纹等形态特征，即使在光学显微镜下也能辨别，但是壳面上的孔纹、壳缝末梢、螺旋舌和顶孔区等超微结构，都需要通过扫描电子显微镜观察才能获得清晰的认识。孤点也需要扫描电子显微镜观察其内侧构造才能最终确认(参见图版 II 和 III)。本文增加了对帕瓦拉桥弯藻超微结构的更多清晰认识，是世界上第二个对帕瓦拉桥弯藻的报道，且把它的分布区域从印度扩展到了中国的湘江。

参考文献：

AGARDH CA, 1830. Conspectus Criticus Diatomacearum. Part 1[M]. Lundae: Literis Berlingianus: 1-16.

GONG Z, LI Y, METZELTIN D, et al., 2013. New species of *Cymbella* and *Placoneis* (Bacillariophyta) from late Pleistocene fossil, China[J]. Phytotaxa, 150(1): 29-40.

GUIRY MD, GUIRY GM, 2021. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Available from: http://www. algaebase.org (accessed 23 November 2021).

HAMILTON PB, SAVOIE AM, SAYRE CM, et al., 2019a. Novel *Neidium* Pfitzer species from western Canada based upon morphology and plastid DNA sequences[J]. Phytotaxa, 419(1): 39-62.

HAMILTON PB, STACHURA-SUCHOPLES K, KUSBER WH, et al., 2019b. Typification of the puzzling diatom species *Neidium iridis* (Neidiaceae)[J]. Plant Ecol and Evol, 152(2): 392-401.
HU ZJ, LI YL, METZELTIN D, 2013. Three new species of *Cymbella* (Bacillariophyta) from high altitude lakes, China[J]. Acta Bot Croat, 72(2): 359-374.
HU YY, ZHU ZF, SUN X, et al., 2021. *Pomacea canaliculata* is an important invasive species causing ecological vulnerability[J]. J Trop Med, 21(10): 1364-1368. [胡云逸，朱梓锋，孙希，等，2021. 入侵物种福寿螺对不同生态系统的破坏性影响[J]. 热带医学杂志，21(10)：1364-1368.]
KAPUSTIN DA, KULIKOVSKIY M, KOCIOLEK JP, 2018. *Celebesia* gen. nov., a new cymbelloid diatom genus from the ancient Lake Matano (Sulawesi Island, Indonesia)[J]. Nova Hedwigia Beihefte, 146: 147-155.
KRAMMER K, 2002. Diatoms of Europe, vol. 3: *Cymbella*[M]. Ruggell: A.R.G. Gantner Verlag: 159-174.
LI JH, WANG D, YANG M, et al., 2015. Farmer's rice fertilizing behaviors and policy implications[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 24(3): 524-530. [李纪华，王东，杨沫，等，2015. 农民水稻施肥行为研究与政策涵义[J]. 长江流域资源与环境，24(3)：524-530.]
LIU B, WILLIAMS DM, LIU QY, 2018. A new species of *Cymbella* (Cymbellaceae, Bacillariophyceae) from China, possessing valves with both uniseriate and biseriate striae[J]. Phytotaxa, 344(1): 39-46.
LIU B, WILLIAMS DM, LI Y, et al., 2020. Two new species of *Cymbella* (Bacillariophyceae) from China, with comments on their valve dimensions[J]. Diatom Res, 35(1): 99-111.
LIU Q, WU H, LI YL, et al., 2021. One new species of *Cymbella* CA Agardh (Bacillariophyta) from high altitude lakes in the Hengduan Mountains of Southwest China[J]. Acta Bot Croat, 80(2): 184-190.
PAN DL, ZHANG JH, LONG J, et al., 2014. Impacts of golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) on water quality and microbes[J]. Chin J Eco-Agric, 22(1): 58-62. [潘冬丽，张家辉，龙俊，等，2014. 福寿螺对水体环境与水体微生物的影响[J]. 中国生态农业学报，22(1)：58-62.]
ROUND FE, CRAWFORD RM, MANN DG, 1990. The diatoms: biology and morphology of the genera[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 1-747.
SHI ZX, 2013. Flora Algarum Sinicarum Aquae Dulcis. Bacillariophyta Cymbellaceae[M]. Beijing: Science Press, 16: 1-218. [施之新，2013. 中国淡水藻志第十六卷硅藻门桥弯藻科[M]. 北京：科学出版社，16：1-218.]
VIGNESHWARAN A, KARTHICK B, KULIKOVSKIY MS, et al., 2019. A new species of *Cymbella* (Bacillariophyceae, cymbellaceae) from the Pavana river, western ghats, India[J]. Phytotaxa, 395(3): 209-218.
ZHANG W, JÜTTNER I, COX EJ, et al., 2018. *Cymbella liyangensis* sp. nov., a new cymbelloid species (Bacillariophyceae) from streams in North Tianmu Mountain, Jiangsu Province, China[J]. Phytotaxa, 348(1): 14-22.
ZHANG Y, LIAO MN, LI YL, et al., 2021. *Cymbella xiaojinensis* sp. nov., a new cymbelloid diatom species (Bacillariophyceae) from high altitude lakes, China[J]. Phytotaxa, 482(1): 55-64.
ZHANG ZY, RIOUAL P, PENG Y, et al., 2017. *Cymbella pamirensis* sp. nov.(Bacillariophyceae) from an alpine lake in the Pamir Mountains, Northwestern China[J]. Phytotaxa, 308(2): 249-258.